

УДК 629.764 (09)

А. А. Ларин

Национальный технический университет «ХПИ»

ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ РАКЕТ В УКРАИНЕ В 1960-е гг.

Наведені результати аналізу досліджень коливань ракет, що проводились українськими вченими в 60-ті рр. XX століття.

Ключові слова: космічна техніка, балістична ракета, рідинний ракетний двигун, система управління, коливання і динамічна стійкість ракет.

Приведены результаты анализа исследований колебаний ракет, проводившихся украинскими учеными в 60-е гг. XX века.

Ключевые слова: космическая техника, баллистическая ракета, жидкостный ракетный двигатель, система управления, колебания и динамическая устойчивость ракет.

The article covers the research of rockets vibrations from Ukrainian scientists in 60-th years XX century.

Key words: space engineering, ballistic rocket, liquid-propellant rocket, control system, vibrations and dynamic stability of rockets.

В 1950-е годы Украина стала крупнейшим производителем ракетной и космической техники. Это связано со строительством в Днепропетровске Южного машиностроительного завода и созданием при нем ОКБ-586 под руководством М. К. Янгеля. Кроме того, в Харькове в 1951 г. было организовано первое в СССР предприятие для серийного выпуска систем управления (СУ) для ракет и космических летательных аппаратов – ПО «Коммунар». В 1959 г. от него отделилось ОКБ-692 (КБ «Электроприборостроения» – ныне НПО «Хартрон»), предназначенное в основном для разработки СУ ракет производства Южмаша.

В 1960-е гг. производство ракетно-космической техники стало самой передовой и наукоемкой отраслью промышленности. Наряду с другими, оно вызвало

и новые проблемы прикладной теории механических колебаний. При разработке первых отечественных баллистических ракет вопросы прочности их корпусов решались без учета упругих колебаний. Однако расчет корпуса ракеты с помощью коэффициента перегрузки, в большинстве случаев, дает заниженные результаты, и поэтому при создании более совершенных и мощных ракет был заменен более точным динамическим расчетом.

Впервые при определении динамических характеристик полета ракеты пришлось исследовать продольные колебания корпуса с учетом его упругости в ракетах 8К71 и 8К72, в которых проявилась продольная динамическая неустойчивость. В процессе доводки ракеты 8К71 и разработки ракеты 8К72 в ОКБ-1 был проведен целый ряд исследований по уточнению динамической схемы ракеты с четырехблочной компоновкой. Задачами колебаний ракет в конце 1950-х гг. занимались также в НИИ-4, НИИ-88 и НИИ-885. Наиболее значительными работами, посвященными устойчивости и автоколебаниям баллистических ракет с учетом упругих свойств корпуса и подвижности жидкости в баках, были труды Д. Е. Охочимского, Б. И. Рабиновича и К. С. Колесникова [2, с. 8, 306–308].

Несмотря на то, что в 1960-е гг. ракеты стали одним из основных объектов исследования в теории механических колебаний, в истории механики этому вопросу уделено мало внимания. Причиной этого, на наш взгляд, является засекреченность работ, проводившихся в этом направлении. В последние годы появляются работы, посвященные исследованиям колебаний ракет. В основном в них рассматриваются московские институты. Что касается работ украинских ученых, то пока о них появляются отдельные публикации. Можно отметить работы Г. И. Сокол и Е. В. Горбенко, посвященные деятельности профессора Днепропетровского университета Игоря Константиновича Косько (1918–1988). Его докторская диссертация [2] посвящена динамической прочности боевых баллистических ракет при продольных колебаниях. О достижениях И. К. Косько и его учеников подробно рассказано в статье [6].

Статья А. А. Ларина [3] посвящена видному харьковскому ученому профессору Василию Евдокимовичу Бреславскому (1920–1997), чья деятельность связана с задачами колебаний ракет и ракетных двигателей. В 1949 г. он впервые в мире нашел аналитическое решение задачи о свободных изгибных колебаниях цилиндрических оболочек в общей математической постановке [3, с. 15].

Сведения о первых в Украине расчетах колебаний ракет содержатся в книге [4], посвященной истории НПП Хартрон–Аркос (бывшее ОКБ-692).

Однако история решения проблем колебаний ракет нуждается в фундаментальном исследовании, поскольку в истории теории механических колебаний она занимает важное место, так как именно в этой проблеме проявлялись новые колебательные явления и использовались новые методы расчетов, а также привлекались ведущие ученые, работающие в области динамики и прочности машин.

При расчетах ракет рассматриваются два типа колебаний:

а) траекторные колебания – колебания ракеты как абсолютно жесткого тела, при которых основное значение имеют изменения параметров траектории полета. Эти колебания определяют динамику полета ракеты, его устойчивость и управляемость;

б) упругие колебания – циклические изменения напряженно-деформированного состояния конструкции. Эти колебания не только могут привести к возникновению опасных напряжений, вплоть до разрушающих, но и к ухудшению работы оборудования и аппаратуры.

Поскольку устойчивость движения ракеты обеспечивается отдельно по углам тангажа, рыскания и крена, то обычно рассматривают замкнутые динамические системы в каждой из трех плоскостей. При нарушении условий устойчивос-

ти в системі розвиваються колибання, которые могут перейти в почти стационарный колебательный режим. Например, продольные колебания корпуса ракеты вызывают колебания давления в баках и, как следствие, – могут вызвать изменение диаметра бака и прогиба его днища. При этом жидкость в баке перемещается относительно стенок в направлении оси ракеты, отчего возникают колебания подачи топлива в камеру сгорания. В свою очередь колебания давления в камере воздействуют на топливные магистрали и корпус ракеты. Вследствие наличия нелинейностей при некоторых соотношениях параметров колебания могут перейти в стационарный автоколебательный режим с низкой частотой (50–100 Гц). Таким образом, динамические свойства регулируемого объекта (ракеты) могут повлиять на динамические свойства автомата стабилизации и на устойчивость полета.

При таком мощном источнике энергии как ЖРД, автоколебания могут привести к возникновению больших динамических нагрузок в конструкции ракеты, вызывающих повреждение оборудования и приборов. Может произойти даже разрушение конструкции ракеты. На основании анализа динамических свойств, как отдельных частей, так и системы в целом, требуется определить такие соотношения параметров, чтобы номинальный режим работы системы был всегда устойчивым.

Для расчета собственных частот и форм продольных колебаний корпуса применяются две основные расчетные схемы:

- 1) континуальная в виде прямого неоднородного стержня с присоединенными колебательными контурами, моделирующими жидкие наполнители (рис. 1, 2);
- 2) дискретная пружинно-массовая модель, состоящая из элементов с сосредоточенными параметрами.

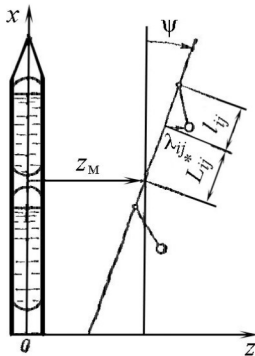


Рис. 1. Модель для изучения поперечных ракеты с учетом колебаний жидкости в баках

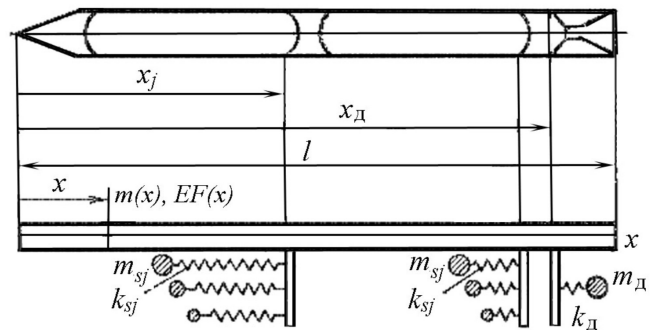


Рис. 2. Модель колебаний ракеты с учетом ракеты в виде неоднородного стержня

Кроме того, в 1960-е гг. применялись балочная расчетная схема и матричный метод. При этом, использовались свойства симметрии конструкции, что позволяло сократить объем вычислений [2, с. 7].

При исследовании поперечных колебаний ракеты ее корпус представляют в виде стержня с переменными по длине массой и жесткостью. Ракета подвержена действию силы тяги двигателей, управляющей силы рулей с градиентом по углу поворота и аэродинамических сил. При этом считается, что небольшие поперечные колебания не оказывают влияния на скорость и ускорение продольного движения. Кроме того, принимается, что:

- 1) аэродинамические силы не зависят от упругих поперечных колебаний корпуса;
- 2) аэродинамические силы, обусловленные движением жесткого корпуса, не вызывают упругих поперечных колебаний;

3) поворот вектора силы тяги вследствие упругих поперечных колебаний корпуса не влияет на движение ракеты как твердого тела.

При этих упрощениях уравнения, описывающие колебания, распадаются на две независимые группы: уравнения возмущенного движения ракеты как твердого тела и уравнения для упругих поперечных колебаний корпуса.

Каждая ступень многоступенчатой жидкостной ракеты состоит из хвостового двигательного отсека, баков для горючего и окислителя, переходного отсека. Большинство из них имеет цилиндрическую форму, а обтекатель и переходные отсеки – форму конуса. Поначалу они рассматривались как твердые тела с полостями, частично заполненными жидкостью. Позже эти составные части корпуса ракеты стали рассматривать как тонкостенные оболочки. Таким образом, бурное развитие авиационной и космической техники в 1960-е гг. вызвало значительный прогресс в теории пластин и оболочек и потребовало проведения исследований их динамики, причем зачастую в нелинейной постановке.

С проблемами колебаний ракет украинские специалисты столкнулись в сентябре 1959 г, когда состоялся первый пуск ракеты Р-12 с первой в СССР шахтной установки «Маяк». Доработка системы управления (СУ) этой ракеты осуществлялась под руководством А. М. Гинзбурга (1911–2000) коллективом СКБ-897 и завершена специалистами ОКБ-692 [4, с. 13]. Пуск оказался неудачным из-за чрезмерных (нерасчетных) вибрационных и акустических нагружений конструкции ракеты при ее движении в шахте. В ряде источников называется недостаточная вибропрочность приборов СУ. В действительности, зажатая газами в стакане шахты ракета вырвалась из нее с оторванной рулевой машинкой и вскоре упала [4, с. 17]. Несмотря на то, что ракета не долетела до цели, ее пуск был огромным успехом, так как была продемонстрирована возможность выхода ракеты из шахты под действием тяги маршевых двигателей. После доработки стартового комплекса последующие пуски прошли успешно, и в 1963 г. ракета была принята на вооружение [4, с. 21].

2 февраля 1961 г. осуществлен первый пуск ракеты Р-16, квалифицированный как успешный, несмотря на потерю устойчивости второй ступени. Испытание вскрыло еще одну техническую и теоретическую проблему – структурную неустойчивость в каналах системы угловой стабилизации, обусловленную колебаниями жидких наполнителей в частично заполненных топливных баках. Чтобы до конца выяснить причины потери устойчивости потребовался еще один пуск, закончившийся с тем же результатом.

Проблема была решена группой динамиков ОКБ-692 в составе А. И. Гудименко, Я. Е. Айзенберга, В. Н. Романенко, В. С. Столетнего с привлечением ученых из НИИ-88 (Б. И. Рабинович и Г. Н. Микишев) и НИИ-4 (Г. С. Нариманов и М. М. Борзюков). С целью получения достоверных исходных данных по динамическим моделям ракет под научно-техническим руководством В. С. Столетнего создан специальный стенд для экспериментального определения структуры и параметров динамической схемы составных ракет с частично заполненными баками. Таким образом, в ОКБ-692, впервые в СССР, решена проблема устойчивости ракеты при колебаниях жидкости в топливных баках.

Со временем, в ОКБ-692 сформировалась школа динамиков. В ней была создана экспериментальная база и теоретическая основа для проектирования и решения проблем стабилизации ракетно-космической техники с полостями, заполненными жидким наполнителем. Методика получения достоверных характеристик динамической схемы объекта была принята в головных организациях (КБ «Южное», НПОМаш, КБ «Салют», ЦНИИМаш, ЦАГИ) [4, с. 30–31].

Теоретическое и экспериментальное исследование характера изменения продольных сил упругости в корпусе ракеты необходимо не только для получения

равнопрочной конструкции ракеты, но и для обеспечения нормального отделения ее ступеней. Так, например, на некоторых ракетах Р-12 в результате неточного определения расчетных растягивающих сил упругости корпуса произошло заклинивание шариковых замков в месте их расположения, отчего головные части этих ракет не отделялись.

Первые работы, проведенные украинскими специалистами с привлечением ученых из Москвы, показали, что ракетно-космическая техника нуждается в более основательных подходах при изучении колебаний. Поэтому, в начале 1960-х гг. к выполнению задач, связанных с вибрациями ракет, были привлечены ведущие институты АН УССР. По запросу ОКБ-586 и постановлению ЦК КПСС и Совета министров СССР № 726-348 от 2.VII.58 и № 1003-476 от 23.VIII.58 Институт механики АН УССР выполнял ряд работ, связанных с исследованием колебаний и динамической устойчивости ракет [5, л. 112]:

В январе 1959 – декабре 1960 г. для ОКБ-586 проводились теоретические и экспериментальные исследования прочности ракеты средней дальности Р-14 и межконтинентальной баллистической ракеты (МБР) Р-16, разработанных в КБ «Южное». Руководил темой академик АН УССР Г. Н. Савин [5, л. 126].

В план научно-исследовательских работ на 1960 г. по проблеме «Научные основы прочности и пластичности» по постановлению Президиума АН УССР от 19 апреля 1960 г. (протокол № 26-I, § 341) была включена тема: «Разработка методов расчета переходных процессов в несущих элементах баллистической ракеты». Сроки выполнения: январь 1960 г. – январь 1963 г., руководитель – д.т.н. А. Н. Голубенцев. Цель работы – определение упругих сил, развиваемых в несущих элементах ракеты и выбор оптимальных параметров переходного процесса в целях снижения действующих усилий и веса ракеты [5, л. 112]. В рамках этой темы разрабатывались методы расчета переходных колебательных процессов, не требующих составления и решения частотного уравнения. В частности, рассматривался расчет переходного процесса МБР при отсечке двигателей и разделении ступеней. Проводились также экспериментальные исследования динамики переходных процессов МБР и экспериментальные исследования колебаний систем с упругими связями из пластических материалов, применительно к конструкциям МБР.

Выполнялась также работа и по проблеме «Теория колебаний и устойчивость оболочек» (сроки выполнения – январь 1960 г. – декабрь 1962 г., руководитель д.ф.-м.н. Н. А. Кильчевский). Цель работы – исследование в линейной и нелинейной постановке теории колебаний статической и динамической устойчивости тонких упругих оболочек. С этой целью, разрабатывалась общая линейная и нелинейная теория оболочек, в частности, были составлены эластостатические и эластодинамические уравнения однородных и слоистых с начальными напряжениями оболочек. Исследованы продольные нестационарные колебания систем гладких цилиндрических и конических оболочек, составляющих корпус изделий 8К64 (Р-16) и 8К65 (Р-14). Исследовалось также влияние подкреплений на динамические свойства ракет [5, л. 115].

К ракетно-космической тематике были подключены и сотрудники Днепропетровского филиала Института механики АН УССР. Так д.т.н. В. А. Лазарян занимался вопросами транспортировки ракет в поездах к месту старта. С января 1960 г. по январь 1962 г. по заказу ОКБ-586 и постановлению Государственного комитета Совета Министров СССР по оборонной технике под его руководством выполнялась тема «Исследование параметров собственных колебаний ракеты при различных степенях заполненности баков и разработка метода моделирования транспортировочных испытаний в лаборатории». Целью работы было изучение основных динамических характеристик ракеты и замена транспортировочных испытаний в натуре (в поездах) испытаниями ракет в лаборатории [5, л. 127]. В. А. Ла-

зарян исследовал собственные частоты продольных колебаний изделий 8К63 (Р-12М), 8К64 (Р-16) и 8К65 (Р-14) [2, с. 306].

В работах по ракетно-космической тематике участвовал также Институт машиноведения и автоматики АН УССР (г. Львов). Там выполнялась работа «Разработка методов динамического моделирования межконтинентальных баллистических ракет». Сроки выполнения – январь 1960 г. – декабрь 1962 г., руководитель д.ф.-м.н. М. Я. Леонов, ответственный исполнитель с.н.с. О. Н. Романив. В работу входило:

а) составление основных уравнений совместных продольных и изгибных колебаний ракеты;

б) уточнение постановки задачи о колебаниях ракеты на моделях (совместно с отделом моделирования Института механики АН УССР);

в) изучение возможности создания простейших электрических моделей продольно-поперечных колебаний ракет [5, л. 131].

С проблемами колебаний ракет связана и Днепропетровская школа нелинейной динамики, возникшая в 1960-е годы. Ее основателем и научным лидером является Леонид Исаакович Маневич. Некоторые классы нелинейных систем допускают точные периодические решения – нормальные колебания. В школе, основанной Л. И. Маневичем, развивается разработанный Р. Розенбергом метод нелинейных нормальных форм колебаний. Основным направлением стало получение аналитических решений в нелинейной теории колебаний, основанное на применении асимптотических методов. В 1976 г. Л. И. Маневич переехал в Москву, а метод нелинейных нормальных форм для существенно нелинейных систем получил дальнейшее развитие в работах его учеников и последователей [7]. Практическое приложение работы днепропетровских ученых находили в задачах динамики и управления полетом ракет и космических летательных аппаратов, их динамики и прочности и других задачах, возникавших на Южном машиностроительном заводе и в КБ «Южное». С распадом СССР и кризисом ракетно-космической отрасли Украины многие видные представители школы Маневича покинули Днепрпетровск, часть из них работает за рубежом, а профессор Ю. В. Михлин в 1995 г. перешел на работу в Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» (НТУ «ХПИ»). С его приходом там стало развиваться аналитическое направление нелинейной теории колебаний. В коллективной монографии [1, с. 166–190, 228–246] Ю. В. Михлин и К. В. Аврамов дают анализ достижений харьковских ученых в этой области.

В дальнейшем, расчетами колебаний ракет занимались в Днепропетровском университете, ОКБ-586, ОКБ-692, Институте проблем машиностроения (г. Харьков) и в НТУ «ХПИ». Деятельность ученых этих организаций в области колебаний ракетно-космической техники представляет большой интерес для специалистов в области истории механики и ракетостроения и нуждается в более подробном исследовании. Данная работа является только первым шагом на указанном пути.

Библиографические ссылки

1. Академик Александр Михайлович Ляпунов: К 150-летию со дня рождения: монография / [Л. Л. Товажнянский, К. В. Аврамов, Е. Е. Александров и др.]. – Харьков, 2007. – 288 с.
2. **Косько И. К.** Динамический анализ и синтез продольных нагрузок ракет : дис. докт. техн. наук / И. К. Косько. – Днепрпетровск, 1971. – 318 с.
3. **Ларін А. О.** Василь Євдокимович Бреславський – видатний вчений-механік (до 90-річчя з дня народження) / А. О. Ларін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Динаміка і міцність машин. – 2010. – Вип. 37. – С. 12–19.

4. Научно-производственное предприятие Хартрон-Аркас. Хроника дат и событий. 1959–2005 гг. – Харьков, 2006. – 212 с.
5. Планы научной деятельности предприятий Академии наук Украинской ССР на 1960 год по закрытой тематике (21.07.1960) 153 л. Центральный государственный архив общественных объединений Украины, ф. 1, оп. 24, ед. хр. 5202.
6. **Сокол Г. И.** О достижениях научной школы профессора И. К. Косько / Г. И. Сокол, Е. В. Горбенко // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія «Історія і філософія науки і техніки». – 2009. – № 1/2, вип. 17. – С. 52–61.
7. **Mikhlin Yu. V.** International Conference «Nonlinear Phenomena in Polymer Solids and Low-Dimensional Systems». – Moscow. – Russia. – 7–10 July. – 2008. – P. 102–107.

Надійшла до редколегії 29.11.2011 р.